



Revue d'économie industrielle

124 | 4e trimestre 2008

Varia

Instabilité et options d'encadrement du marché du CO₂

Carbon market uncertainty and options to stabilize prices

Khalil Helioui, Jean-Luc Sellier et Frédéric Gherzi



Édition électronique

URL : <http://journals.openedition.org/rei/3940>

DOI : 10.4000/rei.3940

ISSN : 1773-0198

Éditeur

De Boeck Supérieur

Édition imprimée

Date de publication : 15 décembre 2008

Pagination : 71-99

ISSN : 0154-3229

Référence électronique

Khalil Helioui, Jean-Luc Sellier et Frédéric Gherzi, « Instabilité et options d'encadrement du marché du CO₂ », *Revue d'économie industrielle* [En ligne], 124 | 4e trimestre 2008, document 4, mis en ligne le 15 décembre 2010, consulté le 19 avril 2019. URL : <http://journals.openedition.org/rei/3940> ; DOI : 10.4000/rei.3940

Khalil HELIOUI ⁽¹⁾
EDF R&D et CIRED (UMR CNRS-EHESS-ENPC-ENGREF)

Jean-Luc SELLIER ⁽²⁾
EDF R&D

Frédéric GHERSI ⁽³⁾
CECO (UMR CNRS-École polytechnique)

INSTABILITÉ ET OPTIONS D'ENCADREMENT DU MARCHÉ DU CO₂ ⁽⁴⁾

Mots-clés : Permis d'émission négociables, marché du carbone, incertitude, mécanismes d'encadrement des prix.

Key words : Tradable emission permits, carbon market, uncertainty, price stabilization mechanisms.

INTRODUCTION

Avec l'adoption du protocole de Kyoto en décembre 1997, près d'une quarantaine de pays industrialisés ou en transition (annexe B) ⁽⁵⁾ se sont engagés, cinq ans après le Sommet de Rio (1992), à plafonner leurs émissions de gaz à effet de serre (GES). Il s'agit, cette fois, d'objectifs contraignants et quantifiés

- (1) Khalil Helioui – Ingénieur chercheur à EDF R&D et chercheur associé au CIRED, CNRS-UMR 8568, Centre International de Recherche sur l'Environnement et le Développement. Ses recherches traitent des questions de choix des instruments de politiques environnementales et de prospective macro-énergétique.
- (2) Jean-Luc Sellier – Ingénieur chercheur expert à EDF R&D en gestion de production et fondamentaux des marchés d'énergie. Ses études concernent l'intégration des contraintes environnementales dans les mécanismes de gestion de production et plus particulièrement les liens entre le marché européen du CO₂ et les marchés de l'énergie.
- (3) Frédéric Gherzi – Chargé de recherche au CNRS, affecté au Laboratoire d'Économétrie de l'École polytechnique, CNRS-UMR 7657, chercheur associé au CIRED. Ses travaux portent sur la modélisation prospective des scénarios énergétiques et climatiques.
- (4) Les auteurs remercient Alix Engelhard, Florent Lestrat, Denis Picon, Ammie Rouelle et Laure Toury ainsi que deux rapporteurs anonymes pour leurs commentaires et suggestions. Ils expriment également leur reconnaissance au Conseil français de l'Énergie pour son soutien financier à l'étude « *Les déterminants techniques, économiques et institutionnels de la valeur du carbone* », dont cet article s'est inspiré. Les points de vue exprimés n'engagent que les auteurs et aucunement leurs institutions de rattachement.
- (5) Ces pays sont listés à l'annexe B du protocole de Kyoto.

sous la forme de quotas nationaux d'émission fixés pour la période 2008-2012. Le protocole envisage que leur soient associés des mécanismes de transfert de permis ou crédits d'émission permettant l'arbitrage des écarts de coûts. Un pays pourrait ainsi respecter ses obligations à l'aide de permis achetés à l'étranger ou encore de crédits d'émission issus de projets innovants dans l'annexe B – mise en œuvre conjointe (MOC) – ou dans les PVD – mécanisme de développement propre (MDP).

Les quotas et les mécanismes de transfert constituent un système de permis d'émission négociables (SPEN) (6). L'Europe en expérimente déjà une version domestique couvrant, pour la période 2005-2007, la production d'électricité et de chaleur, le raffinage ainsi que les principales industries grosses consommatrices d'énergie fossile. Le système communautaire d'échange de quotas d'émission (SCEQE) a vocation à s'intégrer au SPEN en 2008. En Amérique du Nord, des systèmes de permis d'émission se mettent en place en dépit du refus du gouvernement fédéral de ratifier le protocole de Kyoto. Il s'agit aujourd'hui d'actions volontaires mais d'ambitieux programmes obligatoires, tels que le *Regional Greenhouse Gas Initiative* (RGGI), sont en préparation et sont susceptibles d'être à l'avenir connectés au SPEN.

Le SPEN est-il un instrument adapté à l'objectif de long terme de la convention de Rio – la stabilisation des concentrations mondiales de GES à un niveau raisonnable ? L'examen des trois critères imbriqués suivants permet, en principe, d'y répondre : l'efficacité environnementale, l'efficacité économique et l'efficacité politique (Aldy *et al.* 2003 ; Höne 2003). La condition d'acceptabilité politique est cependant prépondérante dans la phase actuelle. Kyoto n'est qu'une promesse de premier pas. Il faudra d'abord la tenir ; de nouveaux plafonds pour la période post-2012 devront aussi être négociés avec les États-Unis et les pays du Sud ; l'effort devra être renouvelé et certainement accentué durant de nombreuses décennies. La question primordiale porte donc sur la capacité du SPEN à réussir l'amorce puis l'élargissement d'une action internationale crédible. Or le dispositif actuel est controversé. Les États-Unis lui reprochent son ambition excessive, principale raison de leur hostilité au protocole de Kyoto (Bodansky, 2001) ; les Européens redoutent, au contraire, qu'il ne soit pas assez incitatif en raison de la grande quantité de quotas excédentaires (*hot air*) à la disposition des économies en transition (EET) (7), de la Russie et de l'Ukraine en particulier. Un prix des permis trop faible pourrait, en effet, décourager les nécessaires changements structurels à long terme et

- (6) Cet article réserve le terme de SPEN à l'ensemble des quotas et mécanismes de flexibilité prévus dans le cadre des engagements de Kyoto et celui de SCEQE au dispositif européen mis en place en 2005 et ayant vocation à s'intégrer dans le SPEN en 2008.
- (7) Il s'agit des pays en transition vers une économie de marché désignés ainsi dans l'annexe B du protocole de Kyoto : Bulgarie, Croatie, Estonie, Fédération de Russie, Hongrie, Lettonie, Lituanie, Pologne, République Tchèque, Roumanie, Slovaquie, Slovénie, Ukraine. Ces pays se retrouveront très certainement avec de grandes quantités de permis d'émission excédentaires à la suite d'une sous-estimation générale de l'ampleur de leur crise de restructuration lors des négociations de Kyoto.

lancer un signal négatif en direction des pays du Sud dont on attend des efforts futurs (Woerdman, 2002). Quant aux modèles de simulation, la confrontation de leurs résultats fait apparaître une dispersion telle qu'elle ne parvient à dissiper ni les craintes des États-Unis ni celles de l'Europe (IPCC, 2001).

L'action climatique amorcée avec le SPEN semble ainsi compromise par une grande incertitude sur la qualité des incitations qu'il pourrait délivrer. L'adoption de dispositifs d'encadrement du marché garantissant un prix des permis d'émission raisonnable, ni trop faible, ni trop fort, apparaît dès lors politiquement souhaitable. Elle est aussi recommandée d'un point de vue normatif. La stabilisation du prix du CO₂ est, d'une part, nécessaire à l'orientation des anticipations en faveur d'investissements à long terme peu émetteurs. Elle permet, d'autre part, de répondre aux aléas en fixant le coût marginal plutôt que le volume des émissions, solution optimale pour les risques lentement cumulatifs tels que le réchauffement planétaire (Weitzman 1974; Newell et Pizer 2003). Le régulateur devrait même, en théorie, se fixer un objectif de prix des permis, idéalement à un niveau égal à l'estimation du dommage climatique marginal, et s'efforcer de le tenir en jouant sur les allocations de quotas. Mal nécessaire dans la plupart des marchés, comme celui des actions où elle est indissociable de l'intégration du flux continu de l'information sur les perspectives économiques, l'incertitude des prix ne reflète essentiellement, dans le cas du SPEN, que les inévitables erreurs de prévision du régulateur. Il n'y a donc, du point de vue de l'efficacité économique et environnementale, aucune sagesse à s'en accommoder et à ne pas tenter d'y remédier.

La suite du papier est organisée en deux sections. La première présente les facteurs d'incertitude technico-économique, institutionnelle et politique avant d'en analyser les effets constatés ou potentiels dans les cas du SCEQE et du SPEN. La seconde section discute des mécanismes envisageables pour encadrer le prix des permis. Dans chaque partie, des résultats de simulation illustrent les raisonnements.

I. — L'INCERTITUDE DES PRIX DU CO₂, UNE ENTRAVE AUX OBJECTIFS NORMATIFS

S'ils offrent des avantages de flexibilité, les systèmes de permis d'émission négociables ont toutefois l'inconvénient de soumettre les participants à l'incertitude sur l'intensité des efforts à fournir. D'irréductibles aléas économiques, technologiques et institutionnels s'opposent à ce que les prix du carbone jouent leur rôle normatif d'orientation positive des anticipations. Cela contraste le bilan que l'on peut tirer de l'expérience européenne et pourrait aussi affecter l'issue politique des engagements de Kyoto.

1.1. Les facteurs d'incertitude

Le prix des permis dépend, pour un ensemble donné de participants et dans l'hypothèse d'un marché concurrentiel, du quota globalement attribué ainsi

que de deux variables fortement incertaines : les émissions tendanciellles et leurs coûts d'inflexion.

1.1.1. Les facteurs technico-économiques

Les émissions tendanciellles correspondent aux émissions que l'on observerait en l'absence d'effort d'inflexion. Elles sont déterminées par la croissance économique générale modulée par les dynamiques spécifiques (8) aux activités émettrices et à leurs évolutions technologiques autonomes lors du renouvellement des équipements (9). L'étude comparative de l'*Energy Modelling Forum* (EMF) sur les résultats de plusieurs modèles (Weyant et Hill, 1999) permet d'estimer l'incertitude attachée à la projection de ces variables. La dispersion, de modèle à modèle, des hypothèses de croissance et de progrès technique se traduit par une indétermination (i) de l'effort (par rapport à la tendance) nécessaire au respect des objectifs de Kyoto et (ii) du volume de *hot air* disponible. Aux alentours de l'an 2000, le premier n'était estimé, par exemple pour l'Europe, que dans une fourchette allant de 17 à 33 % des émissions tendanciellles, tandis que le second variait de 0 à plus de 1 400 Mt CO₂.

Les coûts de réduction des émissions ne sont pas moins incertains. Si l'estimation de la fourchette des coûts des techniques moins émettrices existantes offre déjà matière à discussion (Jaffe *et al.*, 1999), il convient d'y rajouter l'incertitude des effets des politiques climatiques sur l'apprentissage technologique, l'innovation, le niveau de la demande finale et plus généralement sur l'activité économique. Tous ces effets sont évidemment très difficiles à évaluer comme en atteste l'écart type de 60 % des pentes des courbes de coût (marginal) déduites des résultats présentés par l'EMF (*op. cit.*).

1.1.2. Les facteurs institutionnels et politiques

Aux incertitudes sur les fondamentaux économiques et technologiques s'ajoutent celles relatives à l'efficacité du marché et d'autres encore concernant les futurs choix politiques. Les premières portent principalement sur (i) les coûts de transaction susceptibles d'affecter le volume de crédits d'émission issus des projets de MOC et surtout du MDP, et sur (ii) la qualité de la concurrence. Les coûts de transaction sont pour l'essentiel dus aux procédures administratives visant à garantir la réalité des crédits certifiés ; ils sont aussi significatifs que difficiles à estimer (Michaelowa et Stronzik, 2002).

(8) Les émissions du secteur électrique sont ainsi fortement influencées par les conditions météorologiques déterminantes notamment pour le niveau d'activité, la disponibilité des moyens hydrauliques et la durée des pointes.

(9) Le taux de progrès technique autonome est mesuré par la réduction du contenu énergétique de la production obtenue sans incitation particulière par les prix. Les valeurs les plus fréquemment retenues pour ce paramètre varient de 0,5 à 1,5 % par an.

La qualité de la concurrence découle essentiellement de la concentration du marché. Les interrogations sur cet aspect portent surtout sur les modalités de participation des EET dont le volume de *hot air* pourrait les placer en position dominante durant la première période des engagements de Kyoto. L'ampleur des éventuels pouvoirs de marché dépendra fondamentalement du degré d'ouverture du SPEN aux entreprises des pays concernés. Si les EET font le choix d'une gestion centralisée de leurs quotas nationaux, elles pourraient significativement influencer le prix des permis en restreignant leur offre (Bernstein *et al.*, 1999 ; Boehringer et Loeschl, 2001 ; Manne et Richels, 2001). Mais si ces pays décidaient, comme en Europe, de rétrocéder une partie significative de leur quota national à des entreprises, leur position s'en trouverait déconcentrée ; et le risque de pouvoirs de marché en serait réduit ou éliminé.

Les politiques nationales et internationales déterminent enfin des paramètres fondamentaux du marché tels que son étendue sectorielle et géographique ainsi que les règles d'attribution et de renouvellement des quotas. Bien qu'il s'agisse de décisions politiques, ces choix n'en sont pas moins incertains. Au-delà de l'évolution des connaissances scientifiques qu'ils sont supposés prendre en compte, ils reflètent la recherche de fragiles équilibres nationaux et internationaux. Les règles du jeu font, d'une part, l'objet d'intenses efforts de lobbying de parties aux positions souvent opposées. Les autorités de régulation sont, d'autre part, amenées à les réviser en fonction des retours d'expérience. L'aléa réglementaire apparaît donc, au mieux, comme le prix de l'apprentissage institutionnel. Il peut, à chaque instant, affecter le marché par le jeu des anticipations.

1.2. Leçons de l'expérience européenne

Le SCEQE est entré en vigueur le 1^{er} janvier 2005. Il couvre 11 400 installations auxquelles des quotas annuels d'environ 2,2 milliards de tonnes de CO₂ ont été attribués pour la première période d'engagement (2005-2007). Il a vocation, en seconde période (2008-2012), à contribuer aux engagements européens de Kyoto et à se fondre dans le SPEN.

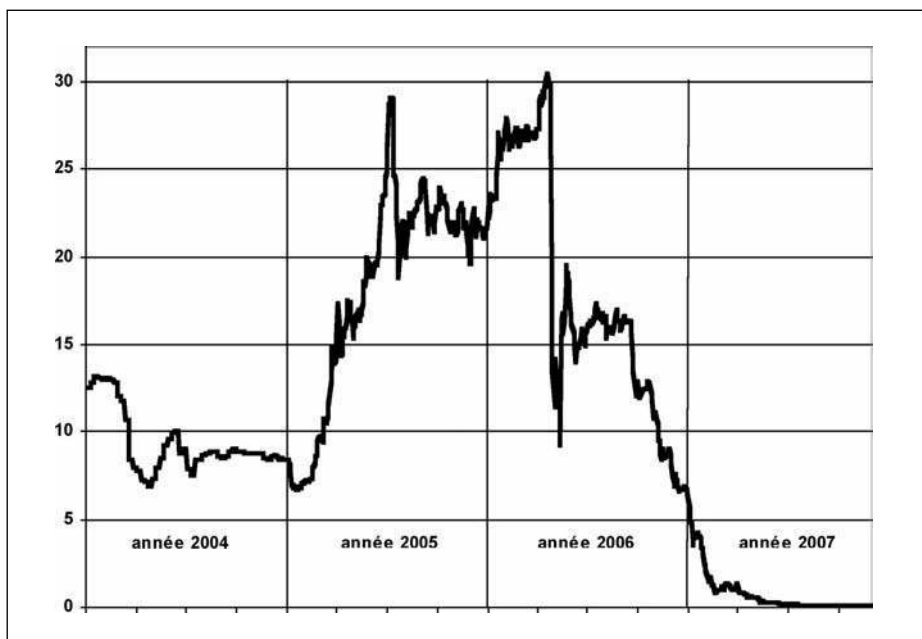
Les quotas sont déterminés à la suite d'un processus de négociation entre la Commission et les États membres sur la base d'hypothèses sectorielles de croissance et d'efficacité énergétique complétées par des objectifs d'effort (10). Les permis correspondants font l'objet de transactions sur les marchés *spot* ou à terme et servent aussi de sous-jacents à des produits dérivés *futures* dont l'échéance, trimestrielle ou annuelle, se prolonge aujourd'hui jus-

(10) La formule type est la suivante (Leseur, 2006) : Allocation = moyenne des émissions historiques des années de référence x facteur de croissance du secteur x facteur de progrès technique x facteur de conformité (taux d'effort).

qu'en 2012. Les permis distribués chaque année en première période pouvaient être utilisés jusqu'à fin 2007. La possibilité de les mettre en réserve pour la seconde période a été initialement laissée à la discrétion des États membres avant que la Commission ne se ravise fin 2006. La chute continue des prix ne laissait en effet plus de doutes sur l'ampleur des sur-allocations de première période. Dans ces conditions, la mise en réserve des permis excédentaires (en vue de leur utilisation en 2008-2012) aurait dangereusement compromis les objectifs de Kyoto.

L'expérience du SCEQE durant la première période d'engagement nous instruit sur le type et l'ampleur des mouvements susceptibles d'affecter un marché du carbone. De fait, le prix des permis européens a connu, en moins de trois ans, de fortes variations (figure 1) illustrant ainsi l'influence de divers facteurs d'incertitude évoqués ci-dessus.

FIGURE 1 : Évolution des prix du CO₂ dans le SCEQE



1.2.1. Internalisation progressive de la contrainte

Les permis européens étaient déjà cotés, plus d'un an avant l'entrée en vigueur des quotas, au travers de transactions à terme. Lorsqu'on observe les prix depuis janvier 2004, on constate qu'ils ont été, durant plus d'un an, totalement corrélés au processus d'élaboration de la première série des plans nationaux d'allocation des quotas (PNAQs) couvrant les années 2005-2007. Le marché vivait au rythme de la communication par les États membres de leur

projet de plan national et de celui, décalé de quelques mois, des négociations et des avis de la Commission européenne.

Initialement stimulé par l'annonce d'un projet de PNAQ anglais jugé ambitieux, le marché a progressivement chuté d'un prix aux alentours de 13 €/tCO₂ à une valeur deux fois moindre en mai 2004. Comment expliquer ce recul ? À la date limite officiellement fixée pour la soumission des PNAQs de l'Europe des 15 (le 31 mars 2004), seule l'Allemagne venait, la veille, de présenter ses objectifs, et ceux-ci étaient manifestement peu contraignants. L'attitude du principal émetteur, qui recevra plus de 23 % des permis européens, devait nécessairement donner la mesure de l'ambition collective. Les autres pays suivirent donc son exemple, sans hâte, avec des plans peu ambitieux, jusqu'à l'Angleterre qui exigera, mais finalement sans succès, la révision et l'assouplissement de son programme initial. À la fin du premier trimestre 2004, les opérateurs avaient ainsi des raisons de douter de la bonne entrée en vigueur du SCEQE. Conséquence logique, la baisse de la valeur des permis a été accentuée par l'avis favorable du Parlement européen (le 20 avril 2004) sur la directive communautaire autorisant l'utilisation des crédits d'émission issus du MDP pour la mise en conformité des installations (*Linking directive*) : la décision signifiait un accroissement de l'offre potentielle de permis.

Le niveau des prix a ensuite oscillé modérément en dessous de dix euros la tonne jusqu'en février 2005, au gré de la soumission des plans des retardataires dans un contexte de négociations tendues à l'issue paraissant incertaine. L'attentisme du marché était renforcé par d'importants retards dans la mise en œuvre des registres nationaux, nécessaires à la concrétisation des transactions, et des bourses organisées.

Le prix des permis a toutefois commencé à se redresser dans la seconde moitié du premier semestre 2005 atteignant une pointe à 30 €/tCO₂ vers mi-juillet. Les cours progressaient à mesure que la Commission envoyait, en rendant des avis sévères sur les projets nationaux, des signaux répétés et convergents attestant de la fermeté de son engagement en faveur de quotas réellement incitatifs et conformes aux objectifs de Kyoto. Bruxelles a par exemple exigé, dans le courant du premier semestre, que la Pologne et l'Italie rabaissent très sensiblement les montants alloués à leurs installations. L'annonce des fortes réserves de la Commission s'est dans les deux cas traduite par une appréciation immédiate des permis de l'ordre d'un euro la tonne (Mission climat, 2006). Quelques mois de négociations semblent ainsi avoir été nécessaires pour que les acteurs prennent véritablement conscience de la contrainte carbone. Survenant au moment de la vague de froid atypique de mars 2005, cette réalité s'est particulièrement imposée au secteur énergétique qui représente plus de 55 % des émissions couvertes et dont les objectifs sont sensiblement plus sévères du fait de sa moindre exposition à la concurrence internationale. Mieux ressentie par les producteurs, la valeur du carbone commençait à se répercuter dans les prix (de gros) de l'électricité. Un signal à même d'encou-

rager le citoyen-consommateur à exercer sa responsabilité environnementale prenait forme.

1.2.2. Rôle des fondamentaux technico-économiques

Initialement prépondérante, l'information réglementaire cède aux fondamentaux technico-économiques son pouvoir explicatif de l'évolution des cours à mesure qu'elle se stabilise. Dans le cas du SCEQE, les conditions d'arbitrage au sein du secteur électrique, qui concentre l'essentiel des quotas et des transactions, jouent un rôle déterminant. Les prix se sont ainsi montrés sensibles aux conditions de températures, d'hydraulicité et aux évolutions des marchés des énergies primaires, avec des variations conformes à la logique économique. Après l'épisode amorcé en mars, la valeur des permis s'est, par exemple à la fin novembre 2005, tendue aux premiers signes pouvant indiquer un hiver plus rigoureux que prévu, synonyme d'un recours accru aux centrales de pointe fortement émettrices. Il en a été de même avec la sécheresse de l'été 2005 dans le sud de l'Europe compromettant le niveau attendu de la production hydroélectrique (non émettrice). Enfin les tensions sur le prix du gaz ont entretenu la tendance haussière durant toute l'année 2005 du fait qu'elles favorisaient le recours au charbon deux fois plus émetteur.

L'examen rétrospectif ne permet cependant pas d'identifier une relation rapprochant le prix des permis d'une notion technico-économique simple et stable de la valeur du CO₂. Le prix des permis devrait pourtant correspondre, en dernière analyse, au coût de la tonne de CO₂ évitée : il faut bien en effet, pour respecter les quotas imposés, qu'à un moment ou à autre des mesures de réduction des émissions, voire de diminution de l'activité, soient mises en œuvre. Mais si l'on peut espérer identifier ces options et mesurer leurs coûts en situation d'équilibre stable, l'exercice devient considérablement plus délicat dans des contextes de fortes incertitudes et de révision continue des anticipations. Or, d'une part, le degré de sévérité de la contrainte globale est resté fortement incertain jusqu'au second semestre 2006 et, d'autre part, la compétitivité relative du gaz par rapport au charbon a été instable depuis 2004. Ces deux facteurs ont entretenu l'indétermination de l'option marginale de contrôle des émissions dont le coût aurait pu servir à fixer les anticipations des opérateurs. La valeur des crédits MDP, autre point d'accrochage potentiel des anticipations, n'a joué qu'un rôle de référence très modeste en raison de l'imaturité de ce mécanisme de projets et de ses coûts de transaction.

Un épisode remarquable nuance cette absence de référence simple à une notion de coût marginal d'évitement. Durant le second trimestre 2005 le prix des permis a coïncidé avec le coût de substitution charbon-gaz dans l'appel des centrales de production électrique. Pendant quelques mois, ses variations répondaient à celles des cours du gaz et du charbon pour neutraliser le différentiel de coût entre les deux technologies. Le prix du CO₂ semblait ainsi « accroché » à ce différentiel. L'accrochage s'est produit dans un contexte d'écart de prix gaz-charbon suffisamment modéré pour que la substitution entre les deux sources apparaisse comme l'option marginale d'évitement.

Mais, avec l'amorce concomitante de l'envolée des cours du gaz, ce raisonnement alimentait la hausse du prix du carbone jusqu'au pic de juillet. La correction fut brusque (un recul d'environ 10 €/tCO₂) et d'autant plus inévitable que les acheteurs commençaient à soupçonner un potentiel d'offre alternative à meilleur marché notamment auprès des industriels (11).

1.2.3. Retournement du marché

Après la forte correction de juillet 2005, le marché est resté stable dans une fourchette de 20 à 24 €/tCO₂ avant de connaître de nouvelles turbulences à partir de février 2006. Les prix sont remontés jusqu'en avril 2006 selon un profil saisonnier similaire à celui de 2005 quoiqu'à un niveau plus élevé. Ils étaient soutenus par la demande du secteur électrique confronté à des conditions climatiques défavorables (hivers rigoureux et faible hydraulicité) et à des prix de l'énergie de nouveau propices à une amorce d'accrochage au différentiel de compétitivité charbon-gaz. La proximité de la date limite de satisfaction aux obligations de 2005 complétait, avec d'autres signaux réglementaires haussiers (12), le tableau.

Mais à la surprise générale, le mois d'avril s'est terminé par un effondrement des cours : en quelques jours, les prix sont passés de près de 30 €/tCO₂ à moins de 10 €/tCO₂. La chute traduit une révision radicale des anticipations sur la sévérité des quotas de la première période d'engagement. Chaque année, en avril-mai, les émissions de l'année précédente sont rendues publiques. L'information est déterminante : elle révèle la situation du budget d'émission écoulé et, selon qu'il a été dépassé ou non, indique pour les années restantes un accroissement probable des efforts ou au contraire leur relâchement. Or à partir du 25 avril, date des premières communications significatives sur les émissions de l'année 2005 (Pays-Bas et République tchèque), on pouvait entrevoir que celles-ci seraient inférieures aux quotas distribués et qu'il se dégagerait un montant significatif de permis excédentaires. L'hypothèse s'est transformée en certitude avec les annonces nationales successives révélant un excédent correspondant à plus de 4 % des quotas alloués surtout en faveur du secteur industriel (Ellerman et Buchner, 2006). Les permis annuels pouvant être mis en réserve, on s'est ensuite logiquement interrogé sur la réalité de la contrainte cumulée sur les années 2005-2007. Pouvait-on lui prêter encore un caractère contraignant alors qu'avec des conditions comparables à celles de 2005 les prochains bilans risquaient aussi d'être excédentaires ? La réponse est

- (11) Le maintien de l'accrochage du prix du carbone au coût de substitution charbon-gaz l'aurait amené à plus de 100 €/tCO₂ au cours du troisième trimestre 2005.
- (12) Il s'agissait d'un moment où la négociation des quotas de seconde période (2008-2012) s'intensifiait, la Commission prévenant de sa volonté de resserrer les contraintes. Ce contexte pouvait influencer sur les prix de première période dans la mesure où la Commission laissait encore le choix aux États membres d'autoriser ou non les mises en réserves pour faciliter les mises en conformité de seconde période.

inscrite dans la trajectoire déclinante des cours à partir du second semestre 2006 avec un permis valant déjà moins d'1 €/tCO₂ six mois avant la fin de la période d'engagement.

En dépit de ses contrôles rigoureux, la Commission s'est donc vraisemblablement trompée, ou laissée abuser, sur la sévérité des PNAQs : le volume des quotas alloués a été indiscutablement excessif. Conçu pour préparer sur trois ans les acteurs communautaires à l'échéance de Kyoto, le premier marché du carbone européen s'est, de fait, paradoxalement transformé, au bout de deux ans, en instrument sans pouvoir incitatif. L'erreur découle nécessairement des hypothèses tendanciennes de croissance et de progrès technique utilisés pour le calcul des allocations : elles apparaissent *a posteriori* optimistes pour les premières, notamment pour le secteur industriel, et pessimistes pour les secondes (Grubb et Neuhoﬀ, 2006). La faute peut certes toujours être imputée au processus de négociation des PNAQs, sans doute perfectible. Mais il reste que les exercices de prévision des taux de croissance et des progrès techniques sont notoirement périlleux ; il faut donc considérer ce type d'erreurs comme la règle plutôt que l'exception (13). Les risques de sur-allocation sont particulièrement élevés en phase d'apprentissage où la prudence dicte de débiter avec des objectifs d'effort modestes. Un objectif correspondant à un faible taux d'inflexion des tendances moyennes, comme par exemple celui ressortant des premiers PNAQs – environ – 1 % (*ibid.*) – se traduit en effet, une fois projeté à l'horizon des contraintes et compte tenu de la largeur de la fourchette d'incertitude des facteurs technico-économiques, par un plafond d'émission bien au-dessus de la valeur basse des émissions de référence (Grubb *et al.*, 2005).

1.2.4. Quel effet d'incitation ?

Quel a été l'effet d'incitation global du SCEQE sur l'ensemble de la première période d'engagement ? Cette question est très débattue. Ellerman et Buchner (2006) l'ont traitée de manière approfondie sur les données de l'année 2005. Bien que les taux de croissance sectoriels soient aujourd'hui mieux connus, les incertitudes sur (i) les émissions historiques des installations et (ii) les hypothèses à retenir sur les progrès techniques tendancielles les empêchent néanmoins de conclure véritablement. Considérant l'ensemble des facteurs

- (13) La question des surplus inutilisés des industriels reste ouverte. Pourquoi ces acteurs n'ont-ils pas vendu leurs permis au moment où les prix étaient élevés ? Beaucoup d'hypothèses ont été émises. Leur impréparation à s'intégrer au SPEN (coûts de transaction) ajoutée à leur crainte de révéler leurs marges de manœuvre au moment où l'on discutait des quotas de seconde période (2008-2012) a été souvent évoquée (Tendances Carbone, 2006). Mais il paraît juste de compléter et de nuancer ces explications, sans doute valables pour certaines installations de petite taille, par d'autres raisons susceptibles de justifier l'attentisme prudent des industriels. Le poids de leur dépendance aux énergies fossiles ainsi que leur exposition à la concurrence internationale peuvent suffire, dans un contexte de forte volatilité du marché du carbone, à expliquer leur refus de prendre le risque de manquer de permis d'émission.

– le niveau élevé des prix du carbone en 2005, des tendances historiques d'émission à la hausse et l'ordre de grandeur des biais éventuels – les auteurs penchent toutefois en faveur d'un effet d'incitation non négligeable. Ils évaluent, à titre d'experts, le montant des émissions évitées à 3 % des valeurs tendanciennes.

Mais le débat n'est pas clos d'autant que cette valeur apparaît peu significative comparée aux potentiels à coûts négatifs d'évitement à moyen terme dans l'industrie européenne, estimés, eux aussi, aux alentours de 3 % (CE, 2004). Quoi qu'il en soit, et à supposer que le SCEQE ait eu un effet réel sur les choix de production, le contexte de forte incertitude n'a certainement pas contribué à des décisions très audacieuses. Le doute est d'autant plus permis qu'une inflexion sérieuse des émissions des secteurs concernés nécessite des investissements lourds et très peu réversibles : de tels choix seront vraisemblablement différés tant que durera l'absence de visibilité sur les objectifs post-2012.

1.3. Menaces à plus long terme

L'intégration du SCEQE dans le SPEN ne diminuera pas les sources d'instabilité du marché du carbone. Les mêmes facteurs d'incertitude seront toujours présents sur une plus grande échelle, avec, nouvelle complication, la participation directe des États.

1.3.1. Démarche d'exploration des incertitudes

Nous explorons les états futurs du SPEN à l'aide de scénarios contrastés et de simulations centrées sur l'année 2010 issues d'un modèle d'équilibre partiel du marché international du carbone – SAP 12 (cf. annexe). Le jeu des scénarios couvre différentes configurations politiques ou institutionnelles envisageables. De ce point de vue, les principales incertitudes portent sans doute sur le degré et la forme de la participation des États-Unis aux efforts des pays restant liés aux engagements de Kyoto. Nous simplifions la question en considérant deux cas polaires : dans le premier, les États-Unis participent au SPEN et se conforment complètement au protocole initial ; dans le second, ils se maintiennent totalement à l'écart des actions du reste de l'annexe B. L'exercice d'un pouvoir de marché de la part des EET est une autre grande interrogation institutionnelle. Nous l'abordons dans un scénario sans les États-Unis, configuration où cette hypothèse mérite particulièrement d'être étudiée.

Les simulations déclinent chaque scénario en plusieurs variantes technico-économiques de façon à balayer un ensemble d'hypothèses concurrentes sur les émissions tendanciennes régionales et leurs coûts associés d'inflexion. En raison de l'incertitude encore plus forte qui les frappe, mais aussi de la sensibilité politique de la question du *hot air*, le jeu d'hypothèses sur les émissions tendanciennes des EET est dédoublé. Dans un premier sous-ensemble, les variantes se conforment, en moyenne, à la projection haute de Müller (2004) ; le montant (moyen) de *hot air* y est donc bas (550 MtCO₂/an). Dans l'autre,

elles suivent l'estimation basse de Klepper et Peterson (2002); le niveau (moyen) de *hot air* y est élevé (1 470 MtCO₂/an).

Les simulations et l'approche en variantes permettent, moyennant de nombreuses simplifications, d'évaluer chaque scénario à travers le calcul d'indicateurs de marché et de mesurer la fréquence ou la probabilité d'événements critiques. En pratique, les diverses parties prenantes au SPEN – gouvernements, entreprises, groupes écologistes, etc. – sont susceptibles de s'intéresser à de nombreux aspects: le coût des engagements, les effets sur la compétitivité internationale, les positions des acteurs sur le marché du carbone, la redistribution des émissions à la suite des transferts, le niveau des efforts domestiques correspondants, etc. Notre présentation se focalise toutefois sur les indicateurs jugés les plus sensibles: le prix des permis et le montant des transferts financiers en faveur des EET. Le prix des permis détermine en effet dans une grande mesure la perception et l'acceptabilité politique de la contrainte carbone, notamment pour les secteurs gros consommateurs d'énergie exposés à la concurrence internationale (Grubb et Neuhoﬀ K, 2006) (14). On conviendra, pour nos besoins d'illustration, qu'un prix des permis « politiquement raisonnable » est compris entre 5 et 10 \$/tCO₂ (15). L'indication de la position de l'ex-bloc de l'Est est quant à elle intéressante car il est communément admis que les pays occidentaux n'accepteront pas de voir la Russie bénéficier de transferts trop substantiels (Nordhaus, 2001) (16). Nous convenons ici que la limite d'acceptabilité politique des transferts en direction des EET est de l'ordre de 10 G\$/an (17).

- (14) Cette variable ne mesure pas à proprement parler le coût du contrôle des émissions, mais plutôt leur coût marginal (sous l'hypothèse d'un marché parfaitement concurrentiel). Elle reste cependant plus tangible que la notion abstraite de coût total. D'une part, celui-ci ne peut être appréhendé, en pratique, que par rapport à un scénario, nécessairement inobservable, où les émissions ne feraient l'objet d'aucun contrôle. D'autre part, estimée à moins de 1 % du PIB par la quasi-totalité des études disponibles (IPCC, 2001), la mesure du coût total pourrait donner, à tort, l'impression que les objectifs de Kyoto sont à l'abri de contestations politiques.
- (15) Le maximum de 10 \$/tCO₂, fixé ici à titre illustratif, correspond à la valeur du prix-plafond (*Safety Valve*) fixé aux États-Unis dans le cadre du RGGI ; la borne basse de 5 \$/tCO₂ correspond quant à elle au niveau en-dessous duquel l'objectif (symbolique) européen de respecter les engagements de Kyoto principalement grâce aux efforts domestiques plutôt qu'à l'aide des importations de permis (CCE, 2006) n'est atteint qu'avec une « probabilité » inférieure à 50 %. Les dollars sont mesurés en unités constantes de l'année 2005.
- (16) Les blocages risquent d'être d'autant plus forts que la contrepartie environnementale des importations en provenance de l'Est sera très discutable en raison de son contenu supposé en *hot air*.
- (17) Cette limite correspond environ au double d'une estimation des besoins annuels de financement du secteur électrique russe pour les dix prochaines années (EIA, 2003). (Il est supposé que le montant des transferts en faveur des PVD ne constitue pas un critère critique d'acceptabilité politique. Exemptés de plafonds d'émission, les PVD ne peuvent en effet offrir au marché que des crédits d'émission certifiés dans le cadre du MDP. Dès lors, le volume d'exportation de ces pays devrait donc être très fortement restreint par les coûts de transaction inhérents à ce mécanisme).

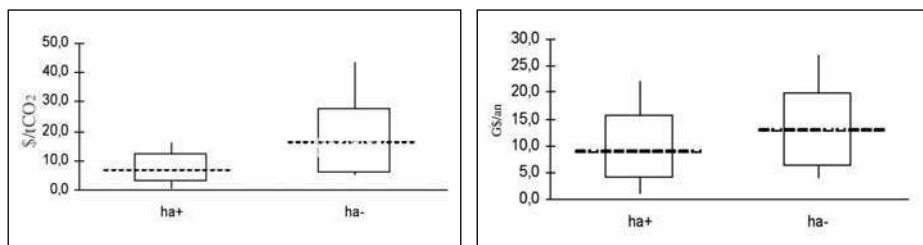
1.3.2. Le spectre du handicap économique

Bien qu'improbable, l'éventualité d'une participation complète des États-Unis aux engagements de Kyoto mérite d'être étudiée. Ce scénario est utile pour montrer qu'au-delà des divergences de sensibilité politique, l'incertitude technico-économique suffit pour justifier des jugements opposés sur le SPEN et décourager certains pays à y participer.

Le protocole de Kyoto attribue aux États-Unis une limite d'émission sévère – moins 7 % par rapport à 1990 – au regard de leurs trajectoires économique et démographique soutenues. Avec une demande potentielle de l'ordre de 1,5 GtCO₂, ils seraient le premier importateur de permis sur le marché du carbone. Mais le *hot air* apporte une offre à coût nul de montant potentiellement comparable. Cet excédent des EET pourrait affaiblir la contrainte globale et rapprocher la fourchette basse des émissions tendancielle de l'annexe B du plafond de Kyoto. Dans une telle situation, la contrainte effective peut, selon la valeur des paramètres économiques, apparaître sévère ou, au contraire, insuffisante.

Les résultats des simulations, sous l'hypothèse d'un marché parfaitement concurrentiel, confirment l'analyse précédente (figure 2) (18). Caractérisés par une grande dispersion, ils suggèrent un risque de surcoût particulièrement élevé. La probabilité que le prix des permis dépasse les 10 \$/tCO₂ est ainsi de 25 % si l'on s'en tient à l'hypothèse haute de *hot air*, mais grimpe à plus de 50 % si l'on considère l'ensemble des deux hypothèses. On constate ainsi, sans surprise, qu'une diminution de l'offre de permis provoque une hausse du prix d'équilibre. Il existe aussi des réalisations favorables à un prix des permis bas. La probabilité qu'il soit inférieur à 5 \$/tCO₂ est ainsi supérieure à 40 % dans le scénario *hot air* haut, et demeure supérieure à 20 % sur l'ensemble des simulations.

FIGURE 2 : Prix du CO₂ et gains nets des EET dans un SPEN avec les États-Unis



- (18) Chacune des figures 2 à 4 représente, pour un scénario donné, cinq indicateurs statistiques des estimations concurrentes du prix des permis et des gains nets d'exportation des EET. La dispersion de ces variables est ainsi représentée par la valeur minimale des estimations (ordonnée de l'extrémité inférieure du trait), leur valeur maximale (ordonnée de l'extrémité supérieure du trait), leur moyenne (trait horizontal en pointillé), leur moyenne moins l'écart-type (ordonnée de la base inférieure), et leur moyenne plus l'écart-type (ordonnée de la base supérieure). Les légendes ha+ et ha- indiquent respectivement les résultats des variantes avec *hot air* haut et bas.

Le risque de prix élevés implique celui de transferts financiers massifs. Les simulations montrent que les transferts en faveur des EET, provenant des pays industrialisés et correspondant au règlement des importations de permis effectuées en sens inverse, peuvent être très élevés. Quelle que soit l'hypothèse de *hot air* retenue, les gains ainsi engrangés sont, en moyenne, de l'ordre de 10 G\$/an, avec un maximum au-delà de 20 G\$/an. On remarquera cependant que l'hypothèse d'un *hot air* bas est plus favorable aux EET que celle d'un *hot air* haut : elle induit un accroissement des prix suffisant pour compenser des volumes d'exportation moindres.

Les résultats précédents éclairent les controverses sur les modalités de mise en œuvre du SPEN ainsi que les risques de blocage de l'action internationale comme ce fut le cas au cours de la conférence de La Haye (2000). Chaque protagoniste peut toujours s'appuyer sur des projections raisonnablement crédibles pour défendre sa position de principe : l'incertitude technico-économique est en effet suffisante pour alimenter aussi bien les critiques des acteurs cherchant surtout à protéger leurs positions économiques et financières internationales – États-Unis et dans une moindre mesure Canada – et de ceux s'attachant à ce que les mécanismes restent incitatifs – Union européenne.

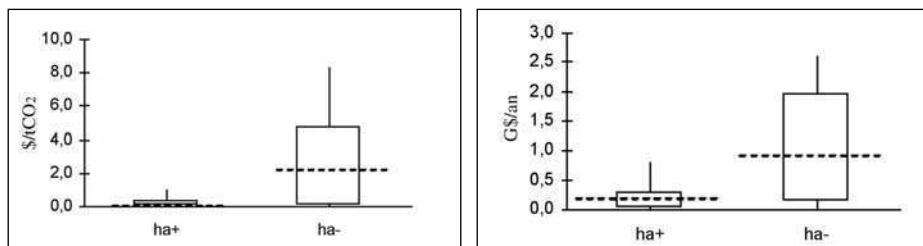
L'hypothèque immédiate sur l'avenir du SPEN provient cependant de la perception que peuvent avoir les pays très gros émetteurs – les États-Unis, mais aussi les grands PVD – sur les coûts qu'ils auront à supporter. Ils refuseront de prendre le risque de compromettre leurs objectifs de croissance économique. Or le phénomène du réchauffement planétaire est, rappelons-le, global : son contrôle nécessite une action collective de longue haleine, inconcevable sans leur participation. La proposition d'une solution de plafonnement des coûts apparaît donc comme un point de passage obligé pour l'après-Kyoto.

1.3.3. *Le risque d'effondrement du signal*

Mais il existe aussi un risque d'incitations trop faibles. Déjà présent en cas de participation des États-Unis, il devient encore plus préoccupant si ceux-ci restent à l'écart du marché du carbone. La mise en œuvre des engagements de Kyoto sans les États-Unis priverait en effet le SPEN de son premier importateur de permis, provoquant la baisse de la demande, et par conséquent, celle des prix.

En maintenant l'hypothèse de comportements parfaitement concurrentiels, les simulations (figure 3) indiquent un prix des permis presque toujours nul (*hot air* haut) ou inférieur à 5 \$/tCO₂ avec une probabilité de 80 % (*hot air* bas). Le signal, supposé refléter le coût de la contrainte environnementale, devient ainsi négligeable parce que la quasi-totalité de l'objectif des régions industrialisées est réalisée par des importations de *hot air* en provenance des EET. Avec un prix des permis si faible, ces importations ne rapportent toutefois que des sommes toujours, inférieures à trois milliards de dollars, soit des niveaux en dessous du seuil jugé critique.

FIGURE 3 : Prix du CO₂ et gains nets des EET dans un SPEN sans les États-Unis



La possibilité d'un prix du marché proche de zéro peut toutefois être contestée de deux manières. Il est d'abord légitime de s'interroger sur la réaction des acteurs. Les gouvernements et, éventuellement, certaines entreprises grosses émettrices de GES des EET assisteront-ils passivement à la disparition de la rente espérée (19)? S'efforceront-ils, au contraire, de rationner leur offre pour soutenir le prix des permis selon un schéma formalisé par Hahn (1984) et Godby (2000)? Dans l'hypothèse extrême où les EET s'organiseraient en cartel, les simulations indiquent que les prix grimperaient, en moyenne, à plus de 9 \$/tCO₂, dépassant les 10 \$/tCO₂ dans 25 % des cas, et restant supérieurs à 5 \$/tCO₂ avec 80 % des chances. La moyenne des transferts en direction des EET passerait alors de moins d'un milliard de dollars à près de trois milliards de dollars.

Le second argument s'opposant à l'hypothèse d'un prix des permis très bas résulte de l'autorisation de mise en réserve des titres non consommés en première période. Il suffit que les EET anticipent des quotas post-2012 plus contraignants que les premiers pour qu'ils soient incités à stocker une partie de leurs permis initiaux, entraînant l'augmentation des prix, même en l'absence de comportements stratégiques (Van Steenberghe, 2002).

Mais ces arguments sont discutables, l'un comme l'autre. Bien qu'elle servirait leur intérêt collectif, les EET auront en effet du mal à organiser et à stabiliser une stratégie de rétention de l'offre de permis, notamment si ceux-ci sont rétrocédés à des entreprises privées. Confrontés à une pression financière incessante, les conglomérats énergétiques concernés risquent, en effet, de ne pas être en mesure de s'astreindre à la discipline que suppose un cartel. Le recours à la mise en réserve est quant à lui tributaire d'une décision internationale sur les quotas post-2012. Or rien ne garantit que celle-ci sera prise suffisamment tôt pour qu'il en soit tenu compte dans les décisions de première

(19) L'analyse théorique et empirique de Maloney et McCormick (1982) suggère que la distribution de la rente de rareté découlant des politiques environnementales peut faciliter l'accord des parties prenantes – gouvernements, entreprises, écologistes – et jouer en faveur d'objectifs ambitieux.

période, ni que les nouveaux quotas seront plus contraignants que les précédents. Dès lors, aucun des deux raisonnements n'élimine avec certitude la possibilité d'un prix des permis d'émission proche de zéro.

Les efforts de l'Europe pour sauver la délicate mécanique de Kyoto seraient mal récompensés si le SPEN finissait par produire un prix du carbone négligeable. Un tel signal compromettrait la préparation d'objectifs post-2012 ambitieux pour les pays industrialisés et ne manquerait pas de nuire à l'effet d'encouragement recherché en direction des PVD. Ayant réussi à obtenir l'entrée en vigueur du protocole de Kyoto sans les États-Unis, les Européens devraient à présent chercher à préserver la valeur démonstrative de leur initiative.

II. — QUELS MÉCANISMES D'ENCADREMENT DES PRIX ?

L'analyse de l'expérience européenne et des scénarios à l'horizon 2010 atteste de l'incertitude intrinsèquement associée à la construction et au fonctionnement du SPEN. Les deux études en signalent les graves implications sur la qualité des incitations délivrées aux émetteurs, la seconde indiquant, de surcroît, les risques qu'elle fait peser sur les dispositions politiques des participants. Ces menaces sur l'avenir du SPEN devraient encourager les décideurs à adopter des mécanismes de stabilisation du prix des permis. Deux types d'approches s'offrent à eux : soit introduire une certaine flexibilité dans l'offre de permis ; soit contrôler les transferts de titres d'émission entre les participants. Une gestion dynamique de l'offre est théoriquement susceptible de neutraliser aussi bien les aléas à la hausse qu'à la baisse tandis que les mesures de limitation des transferts visent à accroître les efforts des parties contraintes ainsi qu'à réduire les effets d'aubaine. Nous présentons les principes généraux de ces mécanismes et discutons des solutions apparaissant les plus pertinentes à l'aide d'illustrations issues de SAPI2.

2.1. Gestion dynamique de la contrainte

La gestion dynamique de l'offre de permis peut prendre plusieurs formes selon les choix retenus pour les critères d'ajustement, le point d'application, les modalités financières et administratives. Les critères le plus souvent discutés pour déterminer (de façon explicite ou non) les ajustements sont soit directement associés au prix des permis, comme par exemple les mécanismes de plafonnement des prix, soit liés à la croissance économique (quotas indexés). D'autres variables corrélées au coût de réduction des émissions, telles que les prix des énergies primaires, pourraient être aussi considérées. Plusieurs choix se présentent également pour le point d'application des ajustements : le régulateur peut agir en amont en jouant sur les allocations initiales des participants ; il peut aussi intervenir en aval en ouvrant un « second guichet » pour vendre ou acheter des permis sur le marché. Les injections et les soutirages de permis sont, de fait, gratuits avec les quotas indexés, mais ils peuvent aussi être

payants (second guichet) ou, dans le cas des injections, faire l'objet de prêts avec ou sans intérêt (Newell *et al.*, 2003). Enfin, les critères d'ajustement ainsi que les modalités techniques et financières peuvent être totalement prédéterminés (prix plafond du RGGI) ou administrés plus ou moins à la discrétion du régulateur, s'il préfère, par exemple, ne pas fixer à l'avance le niveau du prix plafond. Nous n'aborderons ici que (i) les solutions les plus intéressantes au plan théorique et (ii) celles semblant offrir un bon compromis en termes d'efficacité technique et d'acceptabilité politique.

2.1.1. La solution idéale

La solution parfaite au problème de la stabilisation du prix des permis existe en théorie (*ibid.*). Le régulateur fixe à l'avance le budget d'émission à long terme et surtout l'objectif de prix associé qu'il s'engage à maintenir. Il doit ensuite, pour compenser les erreurs de prévision, corriger périodiquement le déséquilibre global offre-demande constaté sur le marché de façon à ce que la contrainte cumulée reste toujours en ligne avec le niveau de prix ciblé. Si le marché est globalement court, l'allocation de la période suivante doit être augmentée; elle doit être diminuée s'il est long. Avec un budget inter-temporel d'émission ayant vocation à rester conforme au prix directeur, les participants au marché n'ont pas de raison de réviser leurs anticipations au grès des aléas affectant les coûts ou le périmètre du SPEN.

Une révision systématique des quotas périodiques peut cependant encourager un laxisme opportuniste des émetteurs préférant parier sur la perspective d'un prochain relâchement de leurs plafonds, devenus plus difficile à atteindre, plutôt que de planifier des efforts à long terme. La rigueur et la crédibilité du régulateur sont donc ici essentiels: il doit être capable de juger de la qualité des comportements et de ne pas assouplir son programme d'allocation en cas d'efforts insuffisants, même si cela implique de sévères reports des contraintes d'émission (*ibid.*). Une autre condition fondamentale, nécessaire à la transformation des quotas périodiques en une contrainte inter-temporelle efficiente, est d'autoriser une totale fongibilité dynamique des permis: ils doivent non seulement pouvoir être mis en réserve, ce qui est déjà acquis dans le cadre des engagements de Kyoto, mais aussi empruntés sur les quotas futurs. Mais cette dernière condition suppose aussi une régulation forte sans laquelle le cumul des emprunts mettrait l'ensemble du système en péril (Guesnerie, 2003). Dans la phase actuelle d'apprentissage collectif, l'hypothèse d'un régulateur dur, imposant et tenant fermement ses résolutions, n'est pas raisonnable. Dès lors, la solution théorique à l'incertitude des prix ne peut être sérieusement envisagée que comme un objectif à long terme.

2.1.2. Les quotas indexés sur l'activité

La définition d'objectifs en termes de contenu en carbone du PIB plutôt qu'en limites fixes d'émission, solution proposée pour faciliter l'engagement des pays en forte croissance (IEA, 2002; Pizer, 2005), réduirait aussi les mouvements du prix des permis (Wing *et al.*, 2006). L'indexation des quotas pério-

diques sur la croissance réalisée présente en effet un double intérêt : elle ajuste la contrainte en fonction du niveau d'activité et, d'un point de vue politique, elle répond aux préventions des pays voyant dans les plafonds absolus d'inacceptables freins à leur développement.

Déclinés au niveau sectoriel, les quotas indexés à la production réduisent les risques des entreprises (par rapport aux plafonds absolus) et bénéficient donc de leur soutien. Leur mise en œuvre nécessite toutefois de s'accommoder d'un défaut d'incitation dû à la corrélation positive introduite entre le niveau de l'activité et le montant des permis alloués (Fisher, 2001).

Les quotas indexés, certainement incontournables pour élargir la participation internationale, n'offrent cependant pas de réponse complète au problème de la stabilisation du prix des permis. La méthode d'indexation à la croissance ne neutralise que l'aléa sur l'activité et laisse le SPEN à la merci de l'incertitude sur les coûts d'inflexion des émissions. Il s'agit donc d'une option, certes essentielle au renforcement de l'action climatique, mais qu'il faudrait compléter par d'autres dispositifs, notamment pour contrôler les risques de surcoûts.

2.1.3. *Le second guichet*

L'ouverture d'une sorte de second guichet ayant pour mission d'intervenir sur le marché afin de stabiliser les prix est une alternative plus réaliste à l'approche théorique d'ajustement dynamique des quotas. Un tel guichet devrait, en principe, aussi bien se positionner à la vente qu'à l'achat pour maintenir un objectif prédéterminé de prix. Mais la faible disposition collective vis-à-vis de nouveaux engagements financiers limite, du moins pour les horizons rapprochés, les configurations réalistes aux mécanismes d'offre additionnelle n'assurant que le plafonnement des prix. Ce type de dispositif, prévu dans le RGGI, peut compter sur un bon soutien international de principe (IEA, 2002). De surcroît, la négociation sur la valeur du prix-plafond devrait pouvoir aboutir en dépit de priorités divergentes entretenues par l'incertitude sur les coûts des quotas. Nous avons, d'un côté, les défenseurs de l'intégrité environnementale estimant qu'il existe de substantielles marges de manœuvre à bas coût et, de l'autre côté, des acteurs plus conservateurs, ou plus prudents, beaucoup plus pessimistes. Les premiers s'accommoderaient d'un mécanisme de plafonnement des prix du moment que le risque d'injections excessives de permis additionnels leur paraît faible. Les seconds seraient quant à eux rassurés d'avoir la garantie d'un coût sensiblement inférieur à celui initialement anticipé. Or, précisément parce qu'ils ne s'entendent pas sur les potentiels de réduction des émissions, les uns et les autres devraient pouvoir s'accorder sur une valeur mutuellement rassurante du prix maximum des permis au milieu de la fourchette de leurs estimations subjectives des coûts marginaux (*ibid.*). Intégré à l'architecture de Kyoto, le second guichet fonctionnerait comme un instrument indirect de transfert ou d'emprunt de permis, géré et garanti par le régulateur. D'une part celui-ci s'engagerait à satisfaire les demandes de permis additionnels, mais d'autre part, il se donnerait la possibilité de compenser les émis-

sions excédentaires. Il pourrait le faire soit en réinvestissant ses recettes dans des projets générateurs de crédits d'émission en dehors de l'annexe B, soit en révisant à la baisse les quotas post-2012.

Un prix-plafond ne présente pas seulement l'avantage d'éliminer les risques de surcoût, il limiterait aussi le volume des importations de permis en provenance des EET. Les importateurs effectuant une partie de leurs achats auprès du second guichet, à chaque fois que le prix des permis atteint son plafond, il en résulterait une diminution des transferts vers les EET. D'après nos calculs, ces derniers passeraient, en introduisant dans le scénario avec participation des États-Unis un prix-plafond de 10\$/tCO₂, à une moyenne de 7,5 G\$/an pour un *hot air* haut et de moins de 6 G\$/an pour un *hot air* bas. Contrairement au cas sans prix-plafond (cf. 1.3.2), la diminution est d'autant plus forte que le volume de *hot air* est limité : la présence d'un prix-plafond empêche la compensation de la réduction du volume d'exportation par le renchérissement du prix ; sur l'ensemble des simulations, la probabilité que les transferts dépassent les 10 G\$/an est inférieure à 10 %, leur maximum n'étant que de 12 G\$/an.

2.2. Contrôle des transactions

Il reste à aborder la question du risque d'effondrement des prix et de relâchement des efforts de contrôle des émissions. La solution la plus accessible politiquement, évitant l'implication financière du régulateur, est de second rang : elle consiste à contraindre les transferts de permis plutôt qu'à réduire leur volume par des rachats sur le marché. La contrainte peut être tarifaire ou quantitative et s'appliquer soit aux importations, soit aux exportations, ou encore à une combinaison des deux. Newell *et al.* (2003) suggèrent même un contrôle indirect du volume des transactions à travers le montant des réserves d'engagement (20). Nous examinons ici deux options retenant particulièrement l'attention des décideurs européens : (i) la limitation des importations de permis et (ii) la mise en place de fonds d'investissement pour la compensation du *hot air*.

2.2.1. La limitation des transferts, une approche peu constructive

Bien que l'Europe invite ses États membres à limiter (en réalité de façon peu contraignante) l'utilisation des crédits MOC et MDP (CCE, 2006), cette méthode est potentiellement contre-productive. Les quotas d'importation

(20) Le SPEN oblige les participants à garder une certaine réserve de permis afin de contrôler les risques de défaillance. La modification du niveau de la réserve réglementaire affecte le montant des permis disponibles pour le marché et, par conséquent, peut influencer les prix. Ce levier ne devrait toutefois pas affecter les prix d'équilibre, où les positions sont par définition parfaitement couvertes, mais il peut servir de manière transitoire à contenir les prix durant les épisodes extrêmes du marché.

pourraient certes encourager des performances domestiques, au risque de pénaliser l'économie européenne, mais sans produire l'effet souhaité sur le prix des permis. Au contraire, en réduisant la demande internationale de titres, ils accentueraient la baisse du prix du carbone, un résultat déjà observé par Ellerman et Wing (2000).

Dans le cas, examiné ici à titre illustratif, d'un scénario sans les États-Unis où l'Europe s'interdirait toute importation de permis, leur prix maximum baisserait de plus de 2 \$/tCO₂ et resterait inférieur à 5 \$/tCO₂ dans plus de 95 % des cas. S'ils obligent les pays qui les appliquent à plus d'efforts, les quotas d'importation ont ainsi bien pour défaut d'aggraver la faiblesse du signal délivré au reste des participants.

2.2.2. Vers un compromis avec une compensation « verte » des ventes de hot air ?

L'obligation de recycler les recettes des exportations de *hot air* dans des fonds d'investissements « verts » est, en revanche, susceptible de soutenir le prix international du carbone. Il ne s'agit plus ici de limiter directement les transferts mais de s'assurer que chaque tonne de *hot air* exportée soit compensée par une réduction d'émission, réelle et additionnelle, de montant équivalent. Motivés par les promesses d'aide occidentale et de transfert de technologie, la plupart des pays concernés, y compris la Russie, sont intéressés par ce mécanisme et bénéficient des conseils de la Banque mondiale pour préparer sa mise en œuvre opérationnelle (Tangen *et al.*, 2002 ; Banque mondiale 2004 et 2006).

L'obligation de compensation « verte » réduit l'offre de *hot air* des EET et augmente les prix d'équilibre (lorsque le volume de *hot air* est élevé). Les réductions compensatoires sont en effet coûteuses. Leur coût marginal devient injustifié dès qu'il dépasse la somme de la valeur directe de la tonne évitée et de sa valeur indirecte – le droit associé à vendre une unité de *hot air* – soit au total le double du prix des permis. Si le volume de *hot air* est suffisamment élevé, ce qui est le cas en pratique, sa fraction non compensée (donc non vendable) reste supérieure aux réductions additionnelles encouragées par le mécanisme de recyclage (cf. annexe).

Le dispositif présente deux avantages par rapport aux limites d'importation. D'une part, celui-là entraîne un effet d'incitation sur l'ensemble des participants au SPEN tandis que celles-ci n'agissent que sur les pays qui les appliquent et ont pour effet pervers de décourager les efforts étrangers. D'autre part, le premier exerce une contrainte auto-régulée en fonction du niveau du prix des permis, contrairement aux secondes. L'obligation de recyclage « vert » entraîne une corrélation positive entre le prix des permis et le volume des exportations de *hot air*. Plus le prix des permis aura tendance à baisser, moins les recettes à réinvestir dans des réductions d'émission additionnelles seront importantes, moins il y aura de *hot air* exportable, et finalement plus le prix des permis sera empêché de diminuer. Une tension des prix sera freinée par le

**FIGURE 4 : Prix du CO₂ et gains nets des EET dans un SPEN
avec un fonds vert**

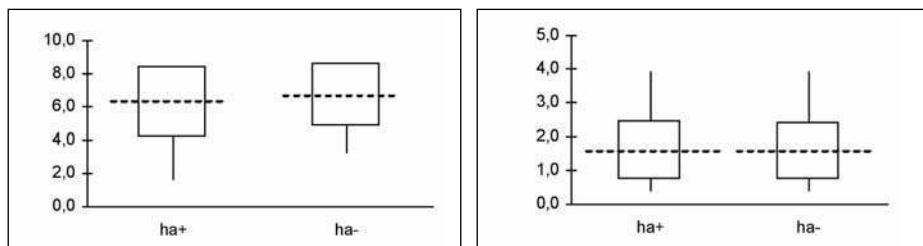


Tableau 1 - Problèmes et solutions d'encadrement du prix des permis

Problème	Exemples d'occurrences réalisées ou possibles	Mécanismes envisageables
Prix excessif	- SPEN (avec les États-Unis) ; - SCEQE (juillet 2005)	- Quotas indexés ; - Second guichet ; - Ajustement dynamique des quotas
Prix trop faible	- SCEQE (de fin 2006 à fin 2007) ; - SPEN (sans les États-Unis)	- Quotas indexés ; - Fonds de compensation verte ; - Ajustement dynamique des quotas

mécanisme inverse : elle permettra des réinvestissements importants se traduisant *in fine* par un plus grand volume d'exportation et un prix des permis moins élevé qu'il n'aurait été autrement.

Les simulations montrent (figure 4) que, dans un scénario sans les États-Unis, l'introduction d'une compensation «verte» amènerait le prix des permis à un niveau moyen raisonnable, de l'ordre de 7 \$/tCO₂, et le maintiendrait au-dessus de 5 \$/tCO₂ avec une probabilité supérieure à 80 % ; les transferts en direction des EET sont contenus en deçà de 4 G\$/an. Enfin, l'obligation de compensation verte neutralise l'incertitude sur le volume de *hot air* : les résultats obtenus avec les hypothèses hautes et basses de *hot air* sont quasiment identiques car l'offre optimale des EET est presque toujours contrainte par la condition de recyclage des exportations de *hot air* et non pas par le volume de celui-ci.

CONCLUSION

Les marchés du carbone subissent une incertitude technico-économique, institutionnelle et politique, considérable et systématique. L'expérience européenne en illustre parfaitement les effets potentiellement déstabilisants. En amont, dans la phase de négociation des règles du jeu, le prix des permis s'accroche d'abord au jeu des propositions et contre-propositions qui peut s'étaler en longueur en l'absence d'autorité supranationale forte. Ensuite, une fois les quotas

fixés à partir d'estimations des émissions tendanciennes, il faut compter avec les inévitables erreurs de prévisions semant les germes des retournements futurs du marché. La contrainte apparaît-elle enfin à peu près stabilisée, les variations aléatoires des fondamentaux technico-économiques entrent alors en scène, compliquant les arbitrages des agents et se prêtant à des phénomènes de bulle.

L'exploration des engagements de Kyoto aboutit au même constat. Selon les réalisations de paramètres technico-économiques très incertains, le prix des permis pourrait être soit trop haut, soit trop bas, et compromettre, dans un cas comme dans l'autre, l'action climatique. Les possibilités d'entrée ou de sortie du SPEN augmentent encore l'amplitude des mouvements à attendre. Le rôle que jouent les modifications du périmètre du SPEN est ici analogue à celui des annonces et contre-annonces de PNAQs dans le SCEQE.

Dans les deux cas, on constate aussi des sur-allocations de quotas. L'existence de permis excédentaires remet en cause les prévisions initiales, mais on ne peut exclure qu'elle sanctionne également des gains de négociation. Ce problème risque donc d'affecter toute la phase d'élargissement du SPEN.

La stabilisation du prix du carbone à un niveau souhaitable s'avère dès lors nécessaire pour permettre la montée en puissance du SPEN et garantir son caractère incitatif. La question ne pose pas de difficultés théoriques mais d'ordre politique. La solution complète de premier rang par ajustement dynamique des quotas doit en effet s'appuyer sur une complète fongibilité temporelle des permis, peu recommandable sans un régime d'observance suffisamment strict. Plus pratiques à mettre en œuvre, les quotas indexés sur la croissance sont susceptibles de réduire les mouvements de prix quoique de manière partielle et imparfaite.

Le plafonnement des prix à l'aide d'un second guichet offre, fort heureusement, une option viable pour éliminer totalement les risques de surcoûts susceptibles de bloquer l'action internationale. Bien administrée, il s'agit, en fait, d'une réponse de premier rang. D'usage commode, elle permet de débiter l'action internationale avec un prix maximum modeste puis de l'élever progressivement en fonction de l'évolution des conditions politiques et de la perception du risque climatique. Les solutions réalistes pour réduire le risque symétrique d'effondrement du signal ne sont, en revanche, que de second rang. La plus intéressante semble être celle des fonds de compensation verte; elle ne permet certes pas de garantir parfaitement un niveau de prix-plancher mais ses performances stabilisatrices sont particulièrement satisfaisantes dans un scénario de prix bas tel que celui du SPEN sans aucune participation des États-Unis.

Au total, une combinaison – prix-plafond et fonds verts – répondrait à la préoccupation européenne d'intégrité environnementale tout en offrant une garantie économique et financière favorable à une reprise de la participation des États-Unis. Un tel dispositif pourrait aussi utilement accompagner et contribuer au succès de l'élargissement du SPEN au reste des grands pays émetteurs.

ANNEXE

DESCRIPTION DU PROGRAMME SAP 12

SAP12 (*Stochastic Assessment of climate Policies*) est un modèle d'équilibre partiel du marché international du carbone à l'horizon 2010. Ses fonctions d'offre ou de demande de permis prennent en compte plusieurs hypothèses concurrentes sur les émissions régionales tendanciennes et leurs courbes associées de coût marginal d'abattement (CCMA). Chaque jeu de fonctions est dérivé des résultats d'un des 12 grands modèles mondiaux multi-sectoriels de l'étude de l'EMF (Weyant et Hill, 1999) : ABARE-GTEM, AIM, G-CUBED, MERGE3, EPPA, MS-MRT, OXFORD, POLES, RICE, SGM, WAGEM, WORLDSCAN. SAP12 en résume ainsi les hypothèses essentielles et permet de simuler une variante technico-économique d'un même scénario de configuration politique ou institutionnelle du SPEN.

L'intérêt de cette démarche est double. D'une part, l'approche en équilibre partiel réduit des modèles complexes à des représentations simples par fonctions d'offre et de demande ; cela permet d'approximer leur fonctionnement sur des scénarios institutionnels ou politiques quelconques et d'introduire facilement des hypothèses *ad hoc* sur les coûts de transaction qui, autrement, seraient négligés. La disponibilité de plusieurs variantes technico-économiques autorise, d'autre part, des mesures de la fréquence d'événements critiques pour le SPEN.

I. — SPÉCIFICATION ET CALAGE DES FONCTIONS D'OFFRE OU DE DEMANDE CONCURRENTIELLES

Les fonctions d'offre ou de demande (concurrentielle) de permis représentent le comportement agrégé d'une région et sa position sur le marché. SAP12 prend en compte les régions suivantes : l'Union européenne ; les États-Unis ; le Japon ; le Canada avec l'Australie et la Nouvelle-Zélande ; les EET ; et le reste du monde, assimilé aux PVD. La fonction F_i^j représentant, dans la variante technico-économique j , l'offre (ou la demande) de la région i s'écrit :

$$F_i^j = A_i^j(p) - \Delta_i^j$$

où $A_i^j(p)$ est le volume de réduction d'émission dans la région i disponible à coût marginal inférieur au prix des permis p ; Δ_i^j représente le déficit potentiel initial en permis, c'est-à-dire les émissions tendanciennes régionales nettes du quota attribué à Kyoto. Quand $A_i^j(p) > \Delta_i^j$, la région i dispose de permis excédentaires, elle est en position d'en offrir au marché ; sa fonction d'offre s'écrit : $O_i^j = A_i^j(p) - \Delta_i^j$. Lorsque $A_i^j(p) < \Delta_i^j$, ses droits initiaux ne suffisent pas à la couverture des émissions, elle doit importer des permis pour respecter ses engagements de Kyoto ; sa demande de titres a pour expression : $D_i^j = \Delta_i^j - A_i^j(p)$.

Les volumes Δ_i^j et les courbes $A_i^j(p)$ sont déduits des résultats présentés par l'EMF (*ibid.*). Pour le calcul des Δ_i^j , il suffit de relever les émissions tendanciellles régionales ET_i^j indiquées dans cette étude pour chaque modèle et d'en soustraire les quotas Q_i^j attribués à Kyoto ainsi que les contributions autorisées à travers les puits de carbone. Par ailleurs, comme suggéré dans la sous-section 1.3.1, il a fallu réviser à la hausse l'incertitude sur le *hot air*. Pour ce faire, la série initiale des émissions tendanciellles des EET a été remplacée par deux séries sensiblement distantes, dérivées par ajustement homothétique à partir d'hypothèses contrastées sur leurs moyennes respectives.

Les réductions domestiques $A_i^j(p)$ sont quant à elles obtenues par inversion des CCMA supposées du type $C_i^j(A) = \alpha A^\beta$. Les CCMA sont calées sur deux familles de résultats. L'une correspond aux différentes estimations des coûts marginaux dans l'hypothèse où les régions respectent les objectifs de Kyoto de façon autarcique, c'est-à-dire sans recourir aux transferts de permis; l'autre indique les estimations concurrentes des émissions régionales E_i^j et du prix des permis lorsque les transferts peuvent avoir lieu. Pour chaque variante technico-économique et pour chaque région, on obtient ainsi, après avoir soustrait des ET_i^j respectivement les Q_i^j pour la première famille et les E_i^j pour la seconde, deux valeurs du type (volume de réduction des émissions domestiques, coût marginal) qui suffisent à caler les fonctions $C_i^j(A)$. Le cas des EET et des PVD est toutefois singulier: il n'y a qu'un seul point pour caler leur CCMA du fait de l'inactivité de leur contrainte d'émission dans le scénario autarcique. La difficulté est résolue en leur attribuant une CCMA linéaire.

II. — REPRÉSENTATION DES COÛTS DE TRANSACTION

Les coûts de transaction sont représentés en modifiant les fonctions d'offre des deux régions exportatrices de permis, les EET et les PVD, conformément à l'approche proposée par Eyckmans *et al.* (2001). Les fonctions $O_i(p)$ décrites ci-dessus sont transformées, pour ces régions, en fonctions $\theta O_i(p(1-t))$. Les coûts de transaction s'imputent ainsi en partie proportionnellement (selon un facteur t) aux recettes d'exportation, tandis qu'une autre partie est responsable d'une réduction, également proportionnelle, du volume de l'offre (selon un taux $1-\theta$).

Les premiers coûts s'interprètent comme des coûts de transaction directs – recherche d'information et négociation – les seconds comme la résultante de contraintes administratives, notamment relatives au contrôle des émissions, ayant pour effet d'éliminer certains projets générateurs de crédits (dans les domaines de l'habitat et des transports, par exemple). Nous retenons pour les simulations les paramètres suivants: $(\theta, t) = (60 \%, 20 \%)$ pour les EET, et $(\theta, t) = (25 \%, 20 \%)$ pour les PVD.

Pour simplifier les notations, les coûts de transaction et certains indices ne sont pas mentionnés dans la suite de l'annexe.

III. — DÉTERMINATION DES ÉQUILIBRES

Le programme SAP12 permet d'envisager trois types d'équilibre du SPEN : l'équilibre parfaitement concurrentiel, l'équilibre de Hahn (1984) résultant du pouvoir de marché d'une région, et l'équilibre avec un *fonds vert* dans lequel les exportations de *hot air* doivent être compensées par des efforts additionnels de réduction des émissions.

3.1. L'équilibre concurrentiel

Dans l'hypothèse où toutes les régions se comportent de manière parfaitement concurrentielle, chacune considère le prix des permis comme une variable exogène et détermine sa position en fonction de celui-ci. L'équilibre du SPEN est alors caractérisé par la condition :

$$\sum F_i(p) = 0$$

qui s'écrit aussi :

$$\sum A_i(p) = \Delta_{\text{Kyoto}} \quad (1)$$

où $\Delta_{\text{Kyoto}} = \sum \Delta_i$. La résolution de l'équation (1) donne le prix d'équilibre p^* du SPEN ainsi que d'autres indicateurs.

3.2. L'équilibre de Hahn

SAP12 permet de considérer des équilibres non parfaitement concurrentiels, où, conformément à l'approche de Hahn (1984), une région manipule le prix des permis en restreignant son offre ou sa demande de titres, tandis que les autres se comportent en *price-takers*. La région m exerçant un pouvoir de marché anticipe que sa position F_m , ou, ce qui revient au même, son effort domestique A_m influence le prix d'équilibre $p_m(A_m)$ résultant de son action. En conséquence, elle optimise sa position selon un programme :

$$\text{Max}_{A_m} p_m(A_m)F_m - CT_m(A_m) \quad (2)$$

où CT_m désigne la fonction de coût total de réduction d'émission de la région m — l'intégrale de sa CCMA C_m . En réécrivant (2) pour y substituer l'identité $F_m = A_m - \Delta_m$, le programme de m devient :

$$\text{Max}_{A_m} p_m(A_m)(A_m - \Delta_m) - CT_m(A_m) \quad (3)$$

dont la condition de premier ordre s'écrit :

$$p_m + \frac{\partial p}{\partial A_m} F_m - C_m = 0$$

où $\frac{\partial p}{\partial A_m}$ s'interprète comme une sensibilité du prix des permis à l'action de la région manipulatrice. La résolution de l'équation (3) détermine l'équilibre de Hahn, équivalent soit à la situation de monopole lorsque la région m vend des permis, soit à celle du monopsonne quand elle est acheteuse. Dans les deux cas, la distorsion comportementale se mesure par l'écart, respectivement positif et négatif, entre le prix des permis et le coût marginal de contrôle des émissions :

$$p_m^* - C_m = - \frac{\partial p}{\partial A_m} F_m$$

3.3. L'équilibre avec le fonds « vert »

L'équilibre concurrentiel avec fonds vert se calcule simplement en modifiant la fonction d'offre des EET utilisée dans la résolution de l'équilibre concurrentiel. L'offre de permis en provenance des EET doit en effet être distinguée selon qu'elle correspond aux résultats d'une véritable politique de réduction des émissions ou simplement à du *hot air*. L'offre du premier type, dont le volume normal s'élève à p/α , α étant la pente de la fonction de coût marginal et p le prix des permis, n'est pas contrainte. Les permis correspondant au *hot air* ne sont quant à eux exportables que s'ils sont compensés par des réductions réelles de montant équivalent. Ces réductions sont nécessairement additionnelles aux efforts normaux du premier type, leur coût marginal est donc supérieur au prix des permis. Mais le surcoût de cette offre spéciale est compensé par le droit qu'elle ouvre à vendre du *hot air*. Permettant l'exportation d'une unité de *hot air*, de valeur p et dont le coût de production est nul, chaque effort additionnel peut être directement valorisé sur le marché au prix p mais il bénéficie aussi, de fait, d'une subvention implicite de montant également égal à p .

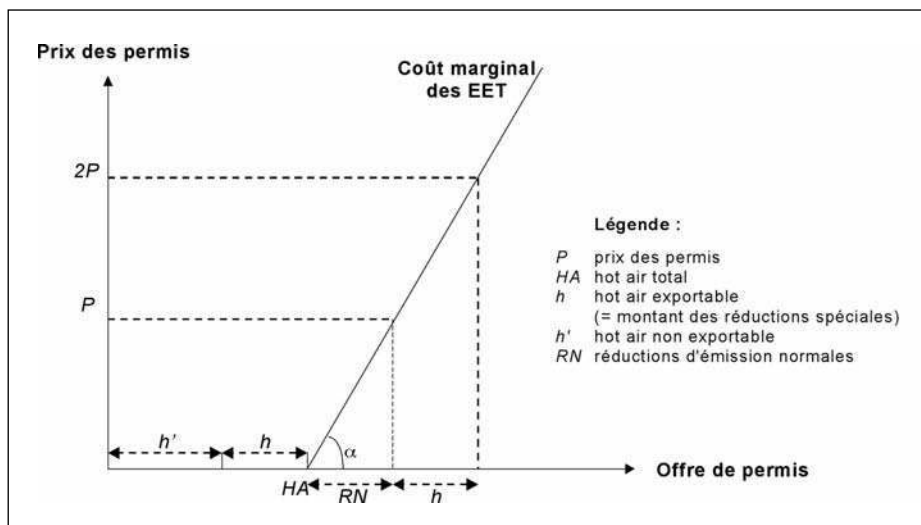
Pour un prix donné des permis, le volume des exportations spéciales, qui est identique au montant de *hot air* exportable h , est doublement limité. Il l'est par le volume total de *hot air* disponible, dont l'éventuel épuisement interrompt la subvention implicite. Il l'est aussi par le coût marginal des efforts : au-delà de la valeur $2p$, c'est-à-dire du prix des permis auquel s'ajoute la subvention implicite de même valeur, l'incitation disparaît (figure 5). Le coût marginal d'une exportation « spéciale » étant compris entre p et $2p$, cela donne un volume maximal de p/α . En résumé, les réductions spéciales, ainsi que le *hot air* exportable qui leur est associé, ont pour expression : $h = \text{Min}(\text{HA}, p/\alpha)$, où HA est le montant initial de *hot air*.

Au total, la nouvelle fonction d'offre des EET prend la forme suivante :

$$O_{\text{EET}}(p) = p/\alpha + 2h$$

où s'ajoute aux réductions « normales », dont l'expression est également p/α , le volume h des réductions additionnelles, multiplié par 2 en raison des exportations de *hot air* de même quantité qu'elles ont rendu possibles.

FIGURE 5 : Fonction d'offre des EET avec le fonds vert



IV. — MESURES DE PROBABILITÉ

Les mesures de probabilité calculée avec SAP12 sont proposées à titre indicatif sans prétendre à une grande précision statistique. Pour un scénario politique donné, il est admis que l'ensemble des variantes technico-économiques offre une bonne représentation de l'incertitude technico-économique à laquelle sont confrontés les décideurs politiques.

À défaut d'études sur la distribution des croyances, il est supposé que chaque scénario est évalué par un décideur représentatif considérant les résultats des variantes technico-économiques de SAP12 comme des issues équiprobables et dont la cohérence individuelle est assurée par celle des modèles sous-jacents. Les probabilités auxquelles nous faisons référence correspondent ainsi à la proportion des variantes pour lesquelles la proposition considérée est vraie. Cette méthode de représentation de l'incertitude du coût des politiques de contrôle des émissions de GES est proche de celle qu'utilisent les climatologues pour quantifier l'incertitude climatique ; la différence entre les deux approches réside dans le mode de génération de l'incertitude : dans le premier cas la dispersion des estimations est produite par le recours aux résultats de différentes équipes de modélisation, dans le second cas la fourchette de variation des paramètres clés est issue de dires d'expert (Murphy *et al.*, 2004).

Voir références pages suivantes

RÉFÉRENCES

- ALDY J.-E., BARRETT S. et STAVINS R.-N. (2003), « Thirteen plus one : a comparison of global architectures », Discussion Paper 03-26, *Resources For The Future*, August.
- Banque mondiale (2006), *Ukraine : Option for designing a Green Investment Scheme under the Kyoto Protocol*, rapport.
- Banque mondiale (2004), *Option for designing a Green Investment Scheme for Bulgaria*, rapport.
- BERNSTEIN P.-M., MONTGOMERY D.-W., RUTHERFORD T.-F. et YANG G.-F., (1999), « Effects of restrictions on international permit trading : the MS-MRT Model », *The Energy Journal*, « The Costs of the Kyoto Protocol : A Multi-Model Evaluation », special issue.
- BOEHRINGER C. et LOESCHL A., (2001), « Market power in international emission trading : the impacts of U.S. withdrawal from the Kyoto Protocol », *Discussion Paper 01-58*, ZEW, Manheim.
- BODANSKY D., (2001), « Bonn voyage : Kyoto uncertain revival », *The National Interest*, Fall 2001.
- CE (2004), « European Energy and Transport – Scenarios on Key Drivers », Commission européenne, direction générale de l'Énergie et des Transports.
- CCE (2006), « Communication de la Commission au Conseil et au Parlement européen », Commission des Communautés Européennes, COM(2006) 725.
- ELLERMAN A.-D., BUCHNER B., (2006), « Over-allocation or abatement ? A preliminary analysis of the EU emissions trading scheme based on the 2005 emissions data », MIT Joint Program on the Science and Policy of Global Change, Report, n° 141, December.
- ELLERMAN A.-D. et WING I.-S., (2000), « Supplementarity : An Invitation to Monopsony ? », *The Energy Journal*, 21(4), pp. 29-59.
- Energy Information Administration (EIA), (2003), « Country Analysis Briefs, Russia », (www.eia.doe.gov/emeu/cabs/russia.html).
- EYCKMANS J., Van REGEMORTER D., et Van STEENBERGHE V., (2001), « Is Kyoto fatally flawed ? an analysis with MacGEM », CLIMNEG/CLIMBEL Working Paper, 48, CORE, université catholique de Louvain, novembre.
- FISHER C. (2001), « Rebating environmental policy revenues : output-based allocations and tradable performance standards », *Resources For the Future*, Discussion paper 01-22.
- GODBY R. (2000), « Market power and emissions trading : theory and laboratory results », *Pacific Economic Review*, 5(3).
- GUESNERIE R., (2003), « Kyoto et l'économie de l'effet de serre », rapport au Conseil d'analyse économique, La Documentation française.
- GRUBB M., NEUHOFF K. (2006), « Allocation and competitiveness in the EU emissions trading scheme : policy overview », *Climate Policy* 6(1).
- GRUBB M., AZAR C., PERSSON U.-M., (2005), « Allowance allocation in the European emission trading system : a commentary », *Climate Policy* 5(1).
- HAHN R.-W., (1984), « Market power and transferable property rights », *Quarterly Journal of Economics*, 99 pp. 753-765.
- HÖHNE N. (2003), « Issues to be addressed on future international action on climate change », *Climate Policy after 2012*, Ghent University, Belgium, November 17-18, Conference draft paper.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), (2001), « Climate Change 2001 : Mitigation : Contribution of Working Group III to the Intergovernmental Panel on Climate Change Third Assessment Report », Cambridge University Press, 762 pp.
- International Energy Agency (IEA), (2002), « Beyond Kyoto : Energy Dynamics and Climate Stabilisation », OECD/IEA.
- JAFFE A.-B., NEWELL R.-G., STAVINS R.-N. (1999), « Energy-efficient technologies and climate change policies : issues and evidence », *Resources for the Future*, Climate Issue Brief n° 19.
- KLEPPER G. et PETERSON S., (2002), « Trading hot air : the influence of permit allocation rules, market power and the US withdrawal from the Kyoto Protocol », Kiel, Inst. für Weltwirtschaft.
- LESEUR A., (2006), « Panorama des plans nationaux d'allocation des quotas en Europe », Caisses des Dépôts, mission Climat, note d'étude n° 8, avril.

- MALONEY M.-T., McCORMICK R.-E. (1982), « A positive theory of environmental quality regulation », *Journal of Law and Economics*, vol. xxv.
- MANNE A.-S. et RICHELIS R.-G., (2001), « US rejection of the Kyoto Protocol : the impact on compliance costs and CO₂ emissions », Working Paper 01-12, AEI-Brooking Joint Center for Regulatory Studies.
- MASTEPANOV A., PLUZHNIKOV O., BERDIN V. et GAVRILOV V., (2000), « Post-Kyoto Energy Strategy of the Russian Federation, Outlooks and Prerequisites of the Kyoto Mechanisms Implementation in the Country », *Climate Policy*, 1(1) pp.
- MICHAELOWA A., STRONZIK M., (2002), « Transaction costs of the Kyoto Mechanisms », HWWA Discussion Paper, 175.
- Mission Climat (2006), *Lettre trimestrielle de la mission Climat de la caisse des Dépôts*, n° 5, janvier.
- MÜLLER B., (2004), « The Kyoto Protocol : Russian Opportunities », The Royal Institute of International Affairs, 12 pp. (<http://www.riia.org/pdf/research/sdp/BMMar04.pdf>).
- MURPHY J.-M., SEXTON D.-M.-H., BARNETT D.-N., JONES G.-S., WEBB M.-J., COLLINS M. et STAINFORTH D.-A., (2004), « Quantification of modelling uncertainties in large ensemble of climate change simulations », *Nature*, 430, 768-772.
- NEWELL R.-G. et PIZER W.-A. (2003), « Regulating stock externalities under uncertainty », *Journal of Environmental Economics and Management*, 45, pp. 416-432.
- NEWELL R.-G., PIZER W., ZHANG J., (2003), « Managing permit markets to stabilize prices », Resources For the Future, Discussion Paper, n° 03-34.
- NORDHAUS W., (2001), « After Kyoto: Alternative Mechanisms to Control Global Warming », 20th Anniversary Meeting of the International Energy Workshop, IIASA, Laxenburg, Autriche, 31 p.
- PIZER W.-A. (2005), « The case for intensity targets », *Climate Policy*, 5(4), p. 455-462.
- TANGEN K., KORPPOO A., BERDIN V., SUGIYAMA T., ENGELHOFFER C., DREXHAGE J., PLUZHNIKOV O., GRUBB M., LEGGE T., MOE A., STERN J., YAMAGUCHI K., (2002), « A Russian Green Investment Scheme - Securing environmental benefits from international emissions trading », (www.climate-strategies.org).
- Tendances Carbone, (2006), *Bulletin mensuel du marché européen du CO₂*, Caisse des Dépôts, n° 1, mars.
- WING I.-S., ELLERMAN A.-D., SONG J. (2006), « Absolute vs. intensity limits for CO₂ emission control : performances under uncertainty », MIT Joint Program on the Science and Policy of Global Change, Report, n° 130, January.
- Van STEENBERGHE V., (2002), « CO₂ abatement costs and permits' price : exploring the impact of banking and the role of future commitments », Working Paper, CORE, université catholique de Louvain, juillet.
- WEITZMAN M.-L. (1974), « Prices vs. quantities », *Review of Economic Studies* 41 (4), 477-491.
- WEYANT J.-P. et HILL J.-N., eds., (1999), « The Costs of the Kyoto Protocol : A Multi-Model Evaluation », *The Energy Journal*, numéro special, 201 p.
- WOERDMAN E., (2002), « Why did the EU Propose to Limit Emissions Trading ? A Theoretical and Empirical Analysis », in : J. ALBRECHT (éd.) *Instruments for Climate Policy – Limited versus unlimited flexibility*, Chap. 4, « New Horizons In Environmental Economics », Edward Elgar, Cheltenham, UK.